УДК 621.833:539.538

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОДОЗНОЙ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ И АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ТРИБОСИСТЕМЕ НА ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СТАЛИ 45

Б.П. Гриценко, О.А. Кашин*

Томский политехнический университет. E-mail: gritsenko@mail.tomsknet.ru
*Институт физики прочности и материаловедения РАН СО. г. Томск
E-mail: okashin@ispms.tsc.ru

Исследовано влияние имплантации ионами Fe, Pb, Mo, и Si на деформационные процессы, происходящие в приповерхностных областях Ст. 45 при трении. Показано, что ионная имплантация может в десятки раз снижать величину износа на стадии приработки. Экспериментально установлено, что, демпфируя распространение акустических колебаний, генерируемых трибологической парой, можно существенно уменьшать износ образцов на первой стадии. Предложено объяснение кинетических кривых изнашивания, учитывающее влияние акустических колебаний, генерируемых в трибосистеме.

Введение

Хорошо известно, что на изнашивание материалов трибологической пары в процессе трения оказывает влияние большое количество факторов, связанных как со свойствами самих материалов, так и с условиями работы этой пары. Выяснение степени влияния каждого из факторов позволяет сделать выводы о механизме изнашивания при трении и наметить практические пути увеличения срока эксплуатации трибосистем. В настоящей работе рассмотрено влияние высокодозной ионной имплантации и акустических колебаний, возникающих в трибосистеме, на развитие деформационных процессов и кинетику изнашивания Ст. 45.

Высокодозная ионная имплантация позволяет добиться повышения износостойкости трибологических пар в 5...10 и более раз [1–6]. Несмотря на достаточно большое количество работ в этой области, до сих пор остается открытым вопрос о механизме этого эффекта. Изменение микроструктуры приповерхностного слоя в результате ионной имплантации – изменение химического состава, образование новых фаз, измельчение зеренной структуры вплоть до аморфного состояния, безусловно, оказывает влияние на свойства материала (микротвердость, коэффициент трения и др.) и может приводить к повышению износостойкости. Однако, толщина модифицированных слоев, как правило, не превышает 1 мкм, поэтому они быстро уносятся при трении. Не помогает в данном случае и объяснение за счет так называемого "эффекта дальнодействия", который заключается в изменении дислокационной субструктуры в результате ионной имплантации на глубины до нескольких десятков мкм. Этот эффект оказывается заметным только для хорошо отожженных однофазных материалов [7].

В работе [3] было показано, что при высокодозной ионной имплантации замедляется развитие фрагментированной структуры приповерхностных слоев на мезоуровне. Было предположено, что именно этим обусловлено повышение износостойкости. В работе [8] приведены экспериментальные результаты, которые свидетельствуют о том, что ионная имплантация задерживает развитие ротационных мод деформации в приповерхностных слоях материала при трении. Однако в этой работе не рассматривается механизм этого влияния. Но и в этом случае остается непонятным, каким образом столь малые слои, которые быстро уносятся при трении, могут тормозить процессы фрагментации на мезоуровне, когда размер мезофрагментов составляет десятки и сотни мкм [3, 9, 10].

Одним из факторов, который может оказывать существенное влияние на все трибологические параметры, такие как изнашивание, коэффициент трения, процессы смазывания и др., является наложение акустических колебаний (АК) на трибосистему [11]. В самом процессе трения также генерируются АК [12], однако их влияние на трение и износ в литературе практически не обсуждается. Для резонансных акустических колебаний их энергии оказывается достаточно, чтобы оказать существенное влияние на разрушения твердых тел при трении. Это было подтверждено нами на примере твердосплавных пластин [9, 13]. О том, что в процессе испытаний на трение в образце возникает целый спектр акустических колебаний различной частоты и мощности, свидетельствуют данные по акустической эмиссии [9, 12, 14–16]. Распространение в материале колебаний большой амплитуды, например, при ударном нагружении, может привести к откольным явлениям [17]. АК ультразвукового диапазона применяют для диспергирования твердых тел и для облегчения процесса резания при металлообработке [18]. При наложении ультразвука на трибосистему снижается коэффициент трения [18]. Общеизвестно, что во всех устройствах стараются избежать вибраций для увеличения срока службы изделий. Приведенные данные свидетельствует о способности АК усиливать процессы деформации и разрушения в металлах и оказывать влияние на характеристики изнашивания. Однако нам не удалось найти в литературе данных о целенаправленном изучении влияния АК, возникающих в самой трибосистеме, на деформационное поведение и разрушение материалов при трении.

Таким образом, имеющиеся к настоящему времени экспериментальные данные не позволяют выявить в полной мере механизмы влияние ионной имплантации и акустических колебаний на изнашивание материалов при трении.

Методика эксперимента

Испытания образцов Ст. 45 проводили по схеме "диск-палец" в режиме граничной смазки. В качестве смазки применяли индустриальное масло И-20. Контртело было изготовлено из стали ШХ 15. Исследования выполняли на специально сконструированной машине трения, аналогичной УМТ-1, но позволяющей изменять характеристики возникающих в процессе трения акустических колебаний. Давление при испытаниях составляло 1 МПа, скорость 1 м/с. Образцы Ст. 45 цилиндрической формы диаметром 10 мм и высотой 20 мм предварительно отжигали в аргоне при атмосферном давлении в течение 3 ч при 850 °С с последующим охлаждением в печи. После такой термообработки микроструктура представляла собой смесь из феррита и перлита примерно в равных объемах. Размер зерен после отжига составлял ~20 мкм. Измерения потери веса образцов в процессе испытаний на трение производили путем их взвешивания на аналитических весах. Погрешность измерений составляла ±25 мкг. Эксперименты проводились при комнатной температуре, средний нагрев образцов не превышал 40 °С.

Изучение деформационных процессов, происходящих в материале при трении, проводили на металлографических шлифах, плоскости которых проходили через пятно контакта и были ориентированы перпендикулярно поверхности трения и параллельно направлению движения образцов по контртелу. Такая схема позволила проследить изменение микроструктуры в объеме материала.

Для изучения влияния АК на характер деформационного поведения и интенсивность износа при трении были проведены испытания с демпфирующими свинцовыми прокладками между торцевыми поверхностями образца, контртела и испытательной машиной. Толщина свинцовых прокладок составляла 3 мм для образцов и 15 мм для контртела. Предполагалось, что использование демпферов позволит эффективно изменять условия распространения акустических колебаний [19].

Для имплантации образцов использовали технологический ускоритель ионов "ДИАНА-2". Режим работы ускорителя частотно-импульсный, ускоряющее напряжение 60 кВ, частота следования импульсов 50 Гц, длительность 200 мкс, флюенс для всех образцов составлял 10^{17} ион/см^2. Имплантацию проводили ионами Fe, Pb, Mo и Si. Эти элементы при имплантации формируют в материале мишени различные структурно-фазовые состояния [1, 2, 5, 6], что позволяет проследить влияние микроструктуры тонких приповерхностных слоев на развитие деформационных процессов при трении и износе.

Экспериментальные результаты

Изучение кинетики изнашивания образцов Ст. 45 в исходном состоянии, и после имплантации ионами железа, свинца, молибдена и кремния показало, что она имеет обычный вид для данных условий испытаний, рис. 1. На этих зависимостях можно выделить две стадии: I стадия – приработки и II стадия – стабильного изнашивания. Из рис. 1 видно, что на стадии стабильного изнашивания скорости потери веса очень малы и близки между собой для исходных и имплантированных образцов.

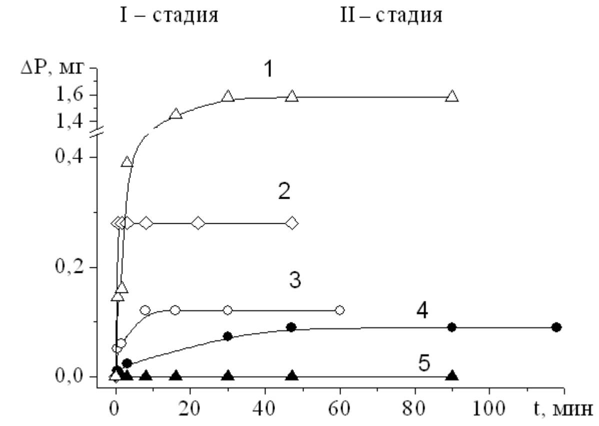


Рис. 1. *Кинетические зависимости потери веса при трении образцов Ст. 45: 1) в исходном состоянии; 2–5) имплантированными ионами: 2) железа, 3) свинца, 4) молибдена, 5) кремния*

Основное отличие наблюдается на стадии приработки. Величины износа на первой стадии у имплантированных образцов были различны для разных типов ионов и существенно ниже, чем у не имплантированных. Наименьшее влияние на величину износа оказала имплантация ионами железа, далее идут свинец и молибден. Имплантация ионами молибдена приводит к уменьшению величины износа на первом участке почти в 20 раз. В случае имплантации образцов ионами кремния износ был настолько мал, что на использованном оборудовании его зарегистрировать не удалось. Отметим, что тип ионов влияет аналогичным образом и на скорость изнашивания на первой стадии: максимальная скорость наблюдается при имплантации ионами железа, минимальная – для ионов кремния.

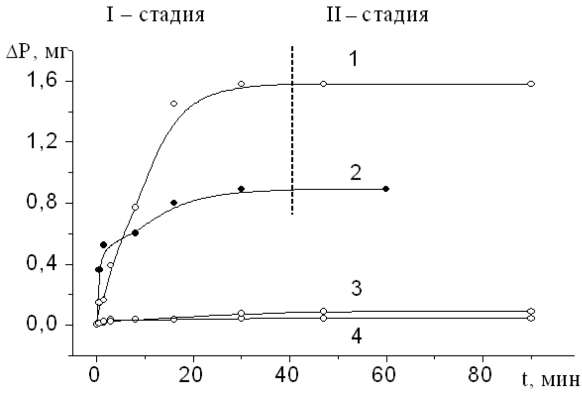


Рис. 2. *Кинетические зависимости потери веса при трении образцов Ст. 45: 1, 2) в исходном состоянии, 3, 4) имплантированных молибденом. 1, 3) обычные испытания, 2, 4) с использованием демпферов на образцах и контртеле*

Влияние АК на изнашивание образцов проиллюстрировано на рис. 2 на примере образцов стали

45 в исходном состоянии, и после имплантации ионами молибдена. Из рисунка видно, что использование демпферов для подавления акустических колебаний не изменяет характера кинетической зависимости изнашивания. Однако подавление АК приводит к уменьшению абсолютной величины износа на стадии приработки примерно в два раза как для исходных образцов, так и для имплантированных ионами молибдена. Скорости изнашивания образцов на второй стадии отличаются незначительно.

Таким образом, и ионная имплантация, и использование демпферов приводят к уменьшению величины износа на стадии приработки. Причем, в случае одновременного использования ионной имплантации и демпфирования АК они влияют на износ не зависимо друг от друга.

Металлографические исследования показали следующее. На рис. 3 представлены некоторые примеры микроструктур исследованных образцов на шлифах, расположенных перпендикулярно поверхности и проходящих через пятно контакта. Микроструктура образца в исходном состоянии до испытаний вблизи поверхности приведена на рис. 3, *а*. На рис. 3, *б* представлен фрагмент шлифа исходного образца после испытания на трение без использования демпферов. На этом фрагменте непосредственно на поверхности трения наблюдается слой с характерным светлым контрастом, который отделен четкой границей от нижележащего материала. Данный слой разбит на мезофрагменты поперечными полосками с периодом 3...4 мкм.

Под поверхностным слоем зерна имеют вытянутую вдоль направления движения образца по контртелу форму. Это свидетельствует о значительной пластической деформации в подповерхностном слое в процессе трения на глубину до 50 мкм.

Аналогичные микроструктуры с тонким измененным приповерхностным слоем и следами пластичес-

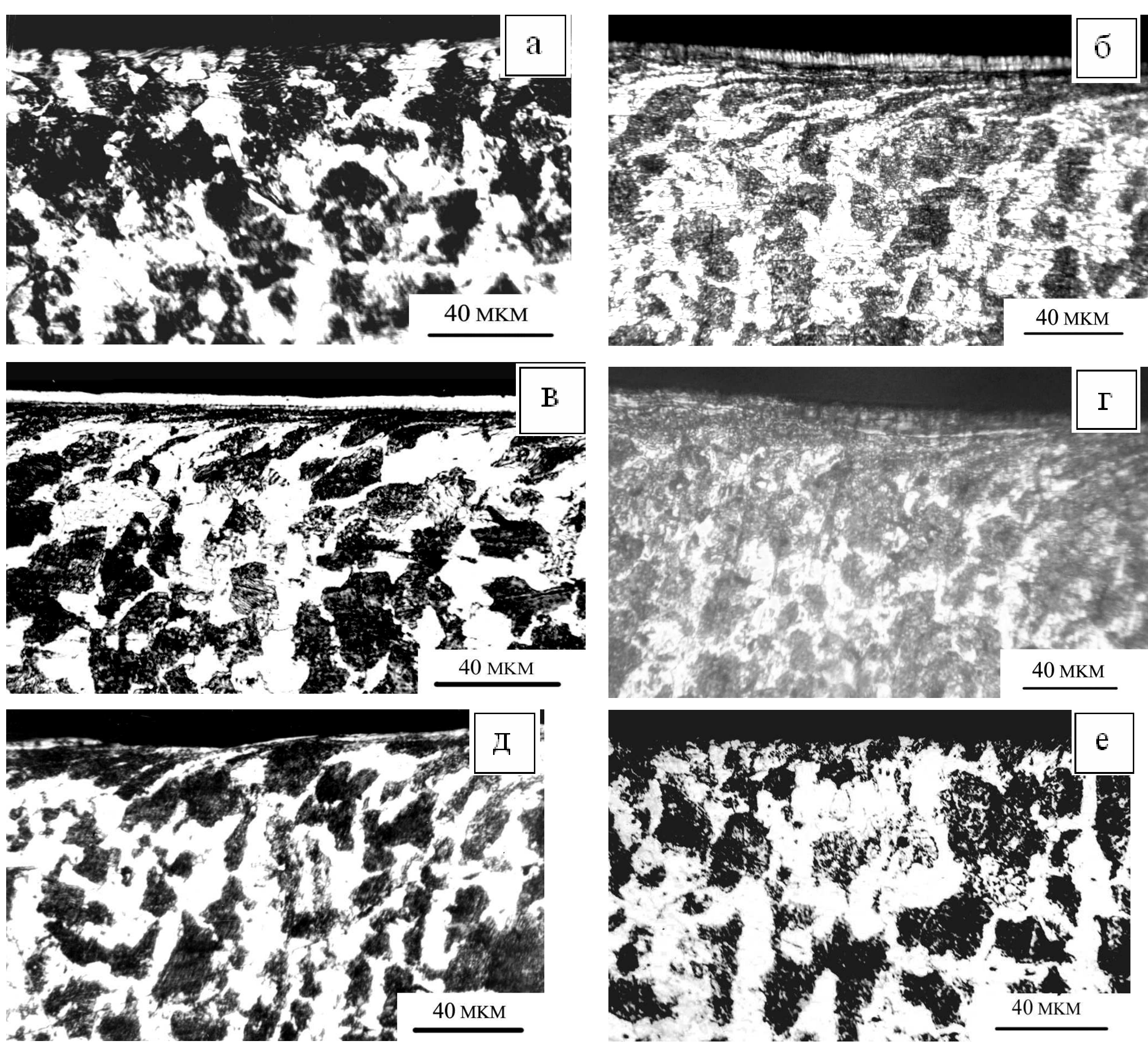


Рис. 3. *Микрофотографии шлифов в плоскости сечения, перпендикулярной поверхности трения и параллельной направлению силы трения: а) исходное состояние; б–е) после испытаний на трение. Исходное состояние: б) без использования демпферов, в) с использованием демпферов. Образцы имплантированы ионами железа: г) без использования демпферов, д) с использования демпферов; и е) ионами молибдена без использования демпферов*

кой деформации можно видеть и на других исследованных образцах (рис. 3, *в–д*): в исходном состоянии с применением демпферов, имплантированных ионами железа при испытаниях с демпферами и без них.

Областей с вытянутыми зернами в приповерхностном слое не было обнаружено на образцах, имплантированных ионами молибдена и кремния (рис. 3, *е*).

Обсуждение результатов

Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о том, что модификация поверхности ионной имплантацией и изменение условий распространения АК в образце используя демпферы – приводит к резкому уменьшению абсолютной величины износа к окончанию стадии приработки. Интенсивное развитие деформационных процессов в приповерхностных слоях материала при трении наблюдается и в исходных, и в ионно-имплантированных образцах.

Анализ полученных в настоящей работе результатов и имеющихся литературных данных позволяет предположить, что АК, возникающие в самой трибосистеме, вносят существенный вклад в разрушение стали при трении, и предложить следующую схему развития деформационных процессов.

С первых моментов трения в образце возникают как объемные, так и поверхностные волны различных типов. Можно назвать, по крайней мере, две причины возникновения акустических колебаний. Первая – вибрация испытательной машины и контртела и передача этих колебаний на образец. Вторая – генерация колебаний в образце вследствие взаимодействия трущихся поверхностей. Амплитуда колебаний в образце может существенно возрастать при наступлении резонансных явлений, когда частота вынуждающей силы совпадает с собственными частотами образца для какого-либо типа волн. По-видимому, вследствие стохастического воздействия вынуждающей силы, резонанс в образце возникает квазипериодически. Можно предполагать и образование стоячих волн, как это наблюдалось в [9]. Эти колебания способствуют более интенсивному развитию деформационных процессов и разрушению поверхностных слоев материала. В зависимости от механизма изнашивания деформационные процессы могут иметь различную природу. В результате деформационного упрочнения в процессе трения на стадии приработки формируется градиентный приповерхностный слой [10], который по мере образования постепенно снижает эффективность влияния акустических колебаний на износ (рис. 1 и 2, кривые для исходного состояния). Подтверждением такого предположения являются результаты работы [14], в которой показано, что амплитуда сигналов акустической эмиссии при испытаниях на трение на стадии приработки уменьшается со временем и достигает минимального значения по окончании стадии приработки. На стадии установившегося изнашивания амплитуда акустической эмиссии и интенсивность изнашивания не изменяются со временем. Акустические колебания способствуют фрагментации материала в приповерхностном слое (рис. 3).

Исходя из предложенной схемы, можно сделать вывод, что для снижения величины износа на стадии приработки необходимо снижать уровень АК. Практически это можно осуществить различными способами [19]. В зависимости от способа подавления можно воздействовать на тот или иной вид АК.

При ионной имплантации формируется ионно-модифицированный слой с резко отличающимися от основного материала физико-механическими свойствами [1–3]. Его толщина при использованных режимах имплантации обычно не превышает 1 мкм. Этот слой, по-видимому, в большей степени влияет на распространение поверхностных акустических волн. Известно, что поверхностные колебания типа волн Рэлея или Лява в твердых телах локализуются в слое толщиной примерно равной длине волны [18]. Таким образом, есть основания предполагать, что наличие даже такого тонкого модифицированного слоя может существенно изменять уровень АК, оказывая тем самым влияние на величину износа. Предложенная схема позволяет объяснить также то, что разные имплантируемые элементы приводят к разным по величине эффектам повышения износостойкости, поскольку формируются слои с различающимися градиентными структурами [1, 2], имеющими, как следствие, разные акустические характеристики.

Необходимо отметить, что скорости износа в ионно-имплантированных образцах после уноса имплантированного слоя не достигают величин, наблюдаемых у не обработанных образцов на первой стадии. Мы предполагаем следующее объяснение этому факту. По мере уноса модифицированного слоя, в процессе трения, происходит формирование обычной градиентной структуры, которая наблюдается в не обработанных образцах [10], и скорость изнашивания не возрастает. Фактически происходит плавный переход в процессе изнашивания от искусственно модифицированных приповерхностных слоев, с помощью ионной имплантации, к естественной модификации за счет деформационных процессов при трении.

Снижение интенсивности износа к окончанию стадии приработки и влияние ионной имплантации в большинстве работ объясняют без привлечения гипотезы влияния акустических колебаний, используя теорию деформационного упрочнения и формирования вторичных структур при трении [2, 8, 10, 15, 16]. Однако результаты экспериментов с применением демпферов с этих позиций трудно интерпретировать. Демпферы в использованной в настоящей работе схеме их размещения влияют на условия распространения только объемных продольных колебаний, распространяющихся в перпендикулярном направлении от поверхности трения. Эти колебания, доходя до границы раздела образца с демпфером, эффективно гасятся за счет разницы модулей упругости сопрягаемых материалов, что приводит к уменьшению амплитуды колебаний даже в случае резонансных явлений или образования стоячих волн. Таким образом, влияние демпферов проявляется уже с первых моментов трения. Процессы де-

формирования и разрушения на стадии приработки развиваются аналогично описанному выше, но теперь для перехода к стадии установившегося износа требуется меньшее упрочнение и меньшее изменение микроструктуры приповерхностного слоя.

Как свидетельствуют данные, представленные на рис. 1 и 2, ионная имплантация оказывает более существенное влияние на величину изнашивания исследованных материалов по сравнению с использованием демпферов. По-видимому, поверхностные колебания типа волн Рэлея и/или Лява в большей степени определяют развитие процессов износа.

Таким образом, установлено, что АК генерирующиеся в трибосистеме эффективно влияют на разрушение материалов, поэтому изучение АК возникающих при трении и их влияние на разрушение материалов является чрезвычайно важной задачей в трибологии. Необходимо также учитывать, что начальный износ изменяет геометрию контактирующих тел и в таких изделиях как резцы, штамповая оснастка (особенно для беззазорных штампов), втулки и др. вследствие этого происходит более быстрый износ на стадии стабильного изнашивания. Основное внимание, с нашей точки зрения, необходимо уделить механизмам возникновения АК в трибосистемах, и их распространению в неоднородных приповерхностных слоях сопрягаемых материалах, влиянию АК на деформационные процессы.

Заключение

Показано, что изменяя условия распространения акустических колебаний можно существенно уменьшать износ трибологической пары на стадии приработки. Причем наиболее эффективным оказывается воздействие на поверхностные акустические колебания.

Предложена схема развития деформационных процессов при трении в условиях граничной смазки с учетом влияния акустических колебаний, генерируемых в самой трибосистеме, которая позволяет объяснить ход кинетических кривых изнашивания для обычных и ионно-имплантированных материалов.

Авторы выражают благодарность В.В. Беспалову за работу по подготовке методики эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ионная имплантация / Под ред. Дж.К. Хирвонена. – М.: Металлургия, 1985. – 392 с.
2. Белый А.В., Карпенко Г.Д., Мышкин Н.К. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев. – М.: Машиностроение, 1991. – 208 с.
3. Легостаева Е.В., Панин С.В., Гриценко Б.П., Шаркеев Ю.П. Исследование процессов пластической деформации на макро, мезо- и микромасштабном уровнях при трении и износе стали 45, поверхностно упрочненной ионной имплантацией // Физическая мезомеханика. – 1999. – Т. 2. – № 5. – С. 79–92.
4. Gritsenko B.P., Bespalov V.V. Formation of near-surface layers of materials for tribologic pairs // 5th Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. – Tomsk, 2000. – P. 338–340.
5. Пат. 2152455 Россия. МКИ C23C 14/48. Способ ионно-лучевой обработки изделий / Б.П. Гриценко, Ю.П. Шаркеев, В.В. Вторушин. Заявлено 31.12.1997; Опубл. 10.07.2000, Бюл. № 19. – 8 с.
6. Пат. 2192502 Россия. МКИ C23C 14/48. Ионно-лучевой способ повышения износостойкости материала изделий / Б.П. Гриценко, В.В. Беспалов. Заявлено 04.12.2000; Опубл. 10.11.2002, Бюл. № 31. – 6 с.
7. Шаркеев Ю.П. Колупаева С.В. Гирсова Н.В. и др. Эффект дальнодействия в металлах при ионной имплантации // Металлы. – 1998. – № 1. – С. 109–115.
8. Легостаева Е.В. Закономерности формирования градиентных микро- и мезоструктур при трении и их роль в изнашивании ионно-имплантированных сталей. – Дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Томск, 2003. – 248 с.
9. Беспалов В.В., Гриценко Б.П. Некоторые особенности разрушения твердосплавных резцов // Трение и износ. – 2000. – Т. 21. – № 5. – С. 511–517.
10. Лоцко Д.В., Мильман Ю.В. Структура приповерхностного слоя механически обработанных кристаллических материалов в связи с механизмом абразивного изнашивания // Трение и износ. – 1993. – Т. 14. – № 1. – С. 73–84.
11. Марков А.И. Ультразвуковая обработка материалов. – М.: Машиностроение. 1980. – 238 с.
12. Попов В.Л., Колубаев А.В. Генерация поверхностных волн при внешнем трении упругих твердых тел // Письма в ЖТФ. – 1995. – Т. 21, вып. 19. – С. 91–94.
13. Беспалов В.В., Гриценко Б.П. Подавление поверхностных мегагерцовых колебаний, возникающих в режущем инструменте // Современные проблемы машиностроения и приборостроения: Труды I Междунар. конф. – Томск, 2003. – С. 133–134.
14. Лебедев В.М., Баранов А.В. Акустические исследования работы трибосопряжений, смазываемых пластичными смазочными материалами // Долговечность трущихся деталей машин / Под ред. Д.Н. Гаркунова. – М.: Машиностроение, 1988. – Вып. 3. – С. 234–243.
15. Булатов В.П., Седакова Е.Б., Козырев Ю.П., Губанова Г.Н., Мелешко Т.К., Кудрявцев В.В. Применение метода акустической эмиссии для оценки изнашивания полимерных композитов на основе полиимида и политетрафторэтилена // Трение и износ. – 2003. – Т. 24. – № 1. – С. 85–91.
16. Холодилов О.В Влияние типа износа полимеров на параметры акустической эмиссии // Известия АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. – 1980. – № 4. – С. 67–73.
17. Каннель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. – М.: Изд-во "Янус-К", 1996. – 408 с.
18. Ультразвук // Маленькая энциклопедия. Гл. ред. И.П. Голямина. – М.: Изд-во "Советская энциклопедия", 1979. – С. 346–347.
19. Пат. 2191662 Россия. МКИ B23B 27/00. Режущий инструмент / Б.П. Гриценко, В.В. Беспалов. Заявлено 20.06.2000; Опубл. 27.10.2002. Бюл. № 30. – 8 с.: ил.